

doi:10.3788/gzxb20174602.0222002

低透过率下隧道照明亮度对能见度的影响

董丽丽¹, 石娜¹, 张利东², 秦莉¹, 许文海¹

(1 大连海事大学 信息科学技术学院 光电实验室, 辽宁 大连 116026)

(2 吉林省高等级公路建设局, 长春 130012)

摘 要: 为了研究低透过率下隧道照明亮度对能见度的影响, 为低透过率条件下隧道照明亮度的调节提供依据, 分别以两种不同光谱特性的摄像机作为观测装置获得了透过率、照明亮度、目标/背景对比度三者之间的变化关系. 实验结果表明: 目标/背景对比度随照明亮度的增加而增加, 两者呈非线性关系; 透过率限定了目标/背景对比度所能达到的最大值; 在一定的亮度范围内, 提高亮度增加目标/背景对比度可以有效改善能见度. 当照明亮度较高时, 提高照明亮度对能见度影响不大; 当照明亮度较低时, 提高照明亮度对能见度提高的效果明显. 因此, 根据透过率按比例调节照明亮度能保证能见度和行车安全.

关键词: 隧道照明; 透过率; 照明亮度; 目标/背景对比度; 能见度

中图分类号: U453.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)02-0222002-8

Influence of Tunnel Lighting Brightness on Visibility under Low Transmittance

DONG Li-li¹, SHI Na¹, ZHANG Li-dong², QIN Li¹, XU Wen-hai¹

(1 Photoelectric Laboratory, School of Information Science and Technology,

Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

(2 High grade Highway Construction Bureau of Jilin Province, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to study the effects of tunnel illumination for visibility under low transmission, and to provide the theoretical basis for tunnel illumination brightness adjustment under low permeability conditions, two cameras with different spectral characteristics were used to be detectors for obtaining the relationship of observation transmittance, lighting levels, the target/background contrast. The results show that the target/background contrast increases with the increase of lighting luminance, there is nonlinear relationship between the two; the maximum value of the target/background contrast that can be achieved is limited by transmission; Improving the target/background contrast and the visibility by increasing lighting luminance can only be effective in a certain brightness range. According to the experiments it is concluded that improving lighting brightness has little effect on visibility under the condition of high lighting level, under the condition of low lighting level, improving the lighting luminance can effectively improve visibility. The lighting luminance should be adjusted in proportion on the base of the concentration of smoke and transmission in order to ensure visibility and driving safety.

Key words: Tunnel lighting; Transmission; Lighting luminance; Target/background contrast; Visibility

OCIS Codes: 220.2945; 330.1800; 330.7320; 040.1520; 120.4640

0 引言

公路隧道一般具有空间狭小、纵深较长、封闭性强等特点, 并且, 由于汽车在行驶时排放的极细颗粒以及

基金项目: 吉林省交通科技项目 (No. 2014-4-1-3) 资助

第一作者: 董丽丽 (1980-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电信息检测. Email: dll_lili@163.com

通讯作者: 石娜 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为隧道照明技术. Email: 473536646@qq.com

收稿日期: 2016-07-25; 录用日期: 2016-10-18

<http://www.photon.ac.cn>

轮胎摩擦地面扬起的灰尘等空气污染物对光线的散射和吸收作用,以及气体扩散不佳等原因,在隧道这种特殊的交通环境中极容易出现低能见度现象.这种现象会导致隧道内照明灯具的照明效果下降,使驾驶员的视觉对比度降低,当视觉对比度低至视觉阈值的时候,驾驶员易对前方的交通情况产生错误判断,影响行驶过程中的定向、定位、确认距离等判断.同时,由于在低能见度的驾驶环境中驾驶员的注意力需要高度集中,易产生驾驶疲劳,使交通速度降低,容易造成交通阻塞、交通秩序混乱等现象,从而导致交通效率降低^[1].可见,改善隧道能见度、确保驾驶员的视觉对比度是保证公路隧道安全运营所要考虑的一个重要方面^[2].

气象能见度是指视力正常的人在当时天气条件下能够从天空背景中看到和辨认出目标物(黑色、大小适中)的最大水平距离.透过率、目标物/背景的亮度对比度、对比度阈值是影响能见度的三个因子.其中透过率是影响能见度的直接因子,因此,要改善隧道内能见度,可以加强隧道通风,将细小颗粒和灰尘等排出隧道,从而降低隧道的烟雾浓度提高光线透过率,这是目前改善隧道能见度的主要方法.同时,要改善低透过率对隧道能见度、隧道照明效果和行车安全的影响理论上也可以通过加强隧道照明的方法,使得在亮度散射损失之余仍能保证足够的视觉亮度和目标/背景对比度,保证目标/背景对比度不小于对比度阈值.但是实际上提高照明亮度对能见度的改善效果和提高程度还未知.目前,国内周豫菡等^[3]研究了公路隧道基本段照明亮度对隧道能见度的影响,通过对大气物理学的能见度公式分析,发现要使隧道能见度良好,需使隧道亮度从入口至出口逐渐增大,亮度增大速率越大,能见度越好;并且若隧道内车辆较多,可以在隧道照明亮度标准的基础上使照明亮度从中间段入口至出口成二次方或三次方增大的改进方法.但是,该研究只是定性的研究了照明亮度的增大对能见度高低的影响,在实际应用中,能否在当时能见度条件下使目标/背景对比度达到视觉阈值从而保证驾驶员行车安全的问题没有完全解决.关雪峰等^[4]用视力等级反映光线在大量水汽凝结环境中的透过情况和视觉可见度的变化规律.通过模拟稳定雾场环境研究不同视觉条件下雾浓度对视力清晰度的影响.实验结论表明无论在何种亮度视觉环境下,视力清晰等级随着雾浓度的增加而降低,当雾浓度大于90%时,清晰度均为零;并且随着环境亮度水平的下降,雾浓度与视力清晰度的变化也越发不稳定;当环境亮度处于中间视觉条件时,视力清晰等级曲线骤然下降.因此建议在大雾天气不过多消耗电力能源的情况下,道路照明设计中的照度值应取高档值或更高的数值.本文利用光透过率仪实时测量透过率值,用目标和背景的亮度对比度表征各种照明亮度时的灯具照明效果(即能见度的好坏),通过测量不同透过率下实验图像中目标和背景的亮度对比度,研究低透过率下公路隧道照明亮度对能见度的影响.

1 能见度的概念

能见度指观察者正常视力下可以清楚看见物体的最大距离.气象学中,能见度定义为大气透明度,其高低通常由空气中的悬浮物(如颗粒物、细微水珠等)的多少来决定.能见度最主要的影响因子有三个:1)一定厚度大气的光线透过率 τ_R ;2)目标物和背景的固有亮度对比度 C_0 ;3)对比度阈值 ϵ ,即人眼的视觉阈值.如式(1)所示,当透过一段大气 R 距离去观察目标物时,实际看到的是视觉对比度 C^* ;只有视觉对比度 C^* 大于视觉阈值 ϵ 时,观察者才能把目标物从背景中识别出来.即

$$C^* = \left| \frac{B - B_b}{B_b} \right| \left(1 + \frac{D_R}{B_b \tau_R} \right)^{-1} > \epsilon \quad (1)$$

式中: B 为目标物亮度; B_b 为背景亮度; C^* 为视觉对比度; τ_R 为光线透过率; D_R 为气柱亮度.其中,背景亮度 B_b 与隧道灯具的照明亮度有关,光线透过率 τ_R 与隧道内颗粒物(即烟雾浓度)有关,气柱亮度 D_R 与隧道照明亮度和烟雾浓度都有关.由式(1)能见度方程^[5-6]可知,当人眼视觉阈值为定值,隧道能见度由照明亮度和光线透过率决定.

人眼视觉阈值受环境影响.实验研究表明,一般日射条件下,视觉对比度阈值最低范围为0.018~0.03,大气学科中常将 C^* 取为0.02.公路隧道中,考虑机动车驾驶的最大安全性,对视觉对比度阈值实际要求非常高.根据国内外公路隧道规范对不同行车速度下设计消光系数和透光率实际推算,通常隧道内视觉对比度阈值在不同车速下取不同的值,一般取为0.61^[7-9].

2 实验系统

为了研究环境照明亮度 L 对视觉对比度 C^* 的影响,在实验室中模拟隧道环境,并进行了实验.在模拟

的实验条件下,以 LED 可调光源作为照明光源,以美国道路照明标准(RP-8-00)建议的小目标为特征指标,以 CCD 摄像机获取的图像中目标和背景的亮度对比度为评价标准,进行实验研究^[10-13]。

2.1 硬件系统的说明

实验系统的硬件组成如图 1 所示^[14-17]。实验系统由密封玻璃钢实验箱、CCD 摄像机、光透过率仪、黑色目标物、LED 可调光源及其控制软件、烟雾器和计算机组成。

密封玻璃钢实验箱的尺寸为 3m×1.5m×2m(长×宽×高),用来模拟隧道照明环境,并营造稳定的烟雾场环境。CCD 摄像机放置在实验箱的一侧高 0.5 米处,用来拍摄路面目标,获取的图像用于后续分析处理^[18]。光透过率仪放置在实验箱内的空处,用来测量实验箱中的透过率^[19]。黑色目标物放置在地面上,体积为 8 m³,其大小是按照美国道路照明标准(RP-8-00)建议的小目标特征指标同比例计算的尺寸。LED 可调光源为实验箱提供照明光源,亮度通过其控制软件进行设定调节。烟雾器释放的烟雾浓度可调节,用来在密封玻璃钢实验箱中产生稳定的烟雾环境,模拟不同透过率的效果。实验时,在密封玻璃钢实验箱外部罩上一层遮光布和一层黑布,防止外界环境光和外界气流对实验结果产生影响。实际的实验系统如图 2 所示。

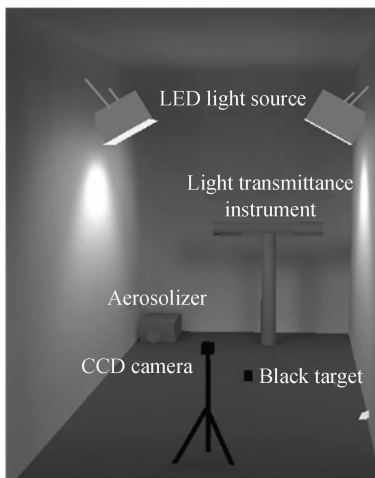


图 1 能见度实验硬件系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware system of visibility experiment



图 2 能见度实验系统

Fig. 2 System diagram of visibility experiment

另外说明的是,实验条件的密闭环境与实际隧道的通风环境不一致,实际的隧道是一个狭长的空间,靠近隧道入口的位置由于通风环境比较复杂,无法在实验室环境中进行模拟。而在远离入口的隧道中,通风量实际上是一个动态平衡的状态,实验中模拟的雾场环境也是一个动态平衡,因此,虽然隧道是半封闭式的,实验环境是封闭式的,但是两者的状态类似。受到实验室空间和环境等限制,在实验室环境中,如果不采用密闭的空间,很难产生雾场环境,所以,使用密闭的有雾环境进行实验。

2.2 实验方法和步骤

整个实验分为透过率测量-亮度调节-成像-造烟雾四个步骤:1)实验箱内不喷烟雾,测量并记录此时的透过率值;2)调节 LED 光源的照明亮度,从 2 cd/m² 调节至 80 cd/m²;3)每改变一次照明亮度,采用 CCD 摄像机对目标物进行拍摄图像;4)使实验箱内处于下一种透过率条件,再重复步骤 2)和步骤 3)的“亮度调节-成像”过程。最终获得不同透过率对应的不同照明亮度时的目标和背景图像。

实验过程中调节的参量主要有两个:透过率和照明亮度。每次实验可以获得 10 种不同的透过率和 10 种不同亮度等级下的 100 组图像,见表 1。

表 1 实验参量

Table 1 Experimental parameters

Parameter	Parameter value	Unit
100 m-transmission	0.05%、2%、10%、30%、50%、60%、70%、80%、90%、94%	/
Brightness	2、5、10、20、30、40、50、60、70、80	cd/m ²

实验中,用摄像机代替人眼作为观测装置,但是两者的光谱特性不同,对同一目标物观测时,获得的观测结果不同。因此,实验中采用两种不同光谱特性的摄像机对目标物进行观测,用以对比不同光谱特性对实验

结果的影响. 摄像机 1 为大恒摄像机, 型号为 DH-SV1421GM; 摄像机 2 为维视摄像机, 型号为 MV-VE120SC. 图 3 为两种摄像机和人眼在明暗视觉下的光谱特征曲线的归一化结果.

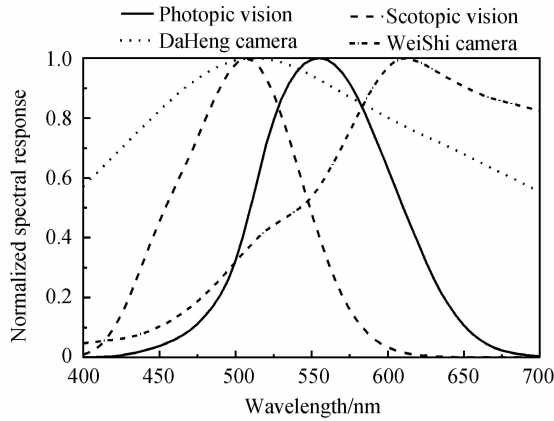


图 3 两台摄像机和人眼的光谱特征曲线

Fig. 3 Spectral characteristic curve of two cameras and human eye

此外, 作为观测装置的摄像机的增益参数的调节也会对实验结果产生影响, 因此, 实验中设置不同的参量, 用以对比采用不同的增益参量对实验结果的影响.

3 实验数据处理及分析

实验共获得了三类图片, 分别为: 采用大恒摄像机(增益为 8.02 dB)测试的 100 组图片; 采用大恒摄像机(增益为 7.05 dB)测试的 100 组图片; 采用维视摄像机(增益为 14.28 dB)测试的 100 组图片.

图 4 为大恒摄像机(增益为 8.02 dB)100 m 透过率为 2% 时不同亮度等级拍摄的图片. 图 5 为大恒摄像机(增益为 8.02 dB)100 m 透过率为 60% 时不同亮度等级拍摄的图像. 从图 4、图 5 中可以看出光线透过率不变时, 随着背景亮度的提高, 目标和背景的对比度加大, 目标更清晰. 比较图 4 和图 5 可知, 在相同的照明亮度下, 透过率高时, 目标看得更清晰.

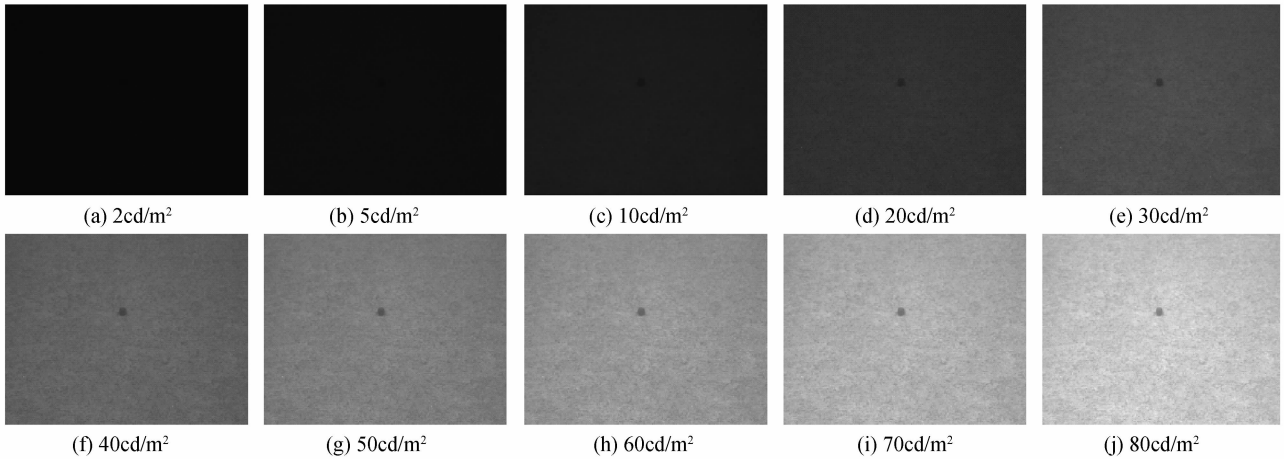
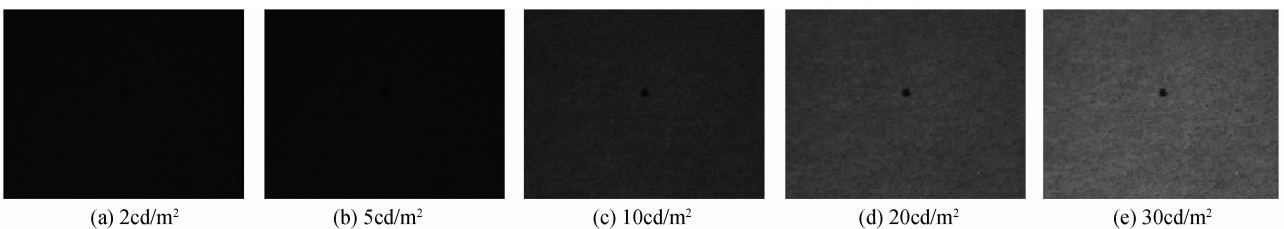


图 4 100 m 透过率为 2% 时不同亮度等级拍摄的实验图片(大恒摄像机, 增益为 8.02 dB)

Fig. 4 The experimental pictures under different brightness levels at the transmission rate of 2% through 100 m (Daheng camera, the gain at 8.02 dB)



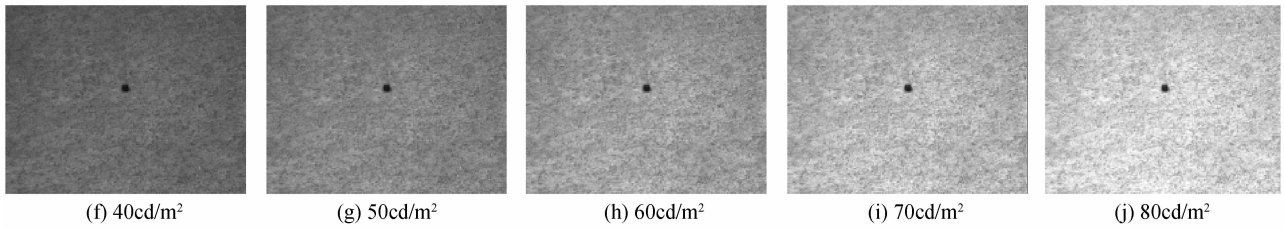


图5 100 m透过率为60%时不同亮度等级拍摄的实验图片(大恒摄像机,增益为8.02 dB)

Fig. 5 The experimental pictures under different brightness levels at the transmission rate of 60% through 100 m (Daheng camera, the gain at 8.02 dB)

利用图像处理的方法获得每种条件下的目标/背景对比度,将同一摄像机同一增益参量下获得的10种不同透过率条件下的目标亮度对比度随照明亮度的变化曲线列于同一个坐标系中,如图6.图6(a)、(b)、(c)分别为采用大恒摄像机、增益为8.02 dB;采用大恒摄像机、增益为7.05 dB;采用维视摄像机、增益为14.28 dB时,绘制的不同透过率条件下目标/亮度对比度随照明亮度的变化曲线.

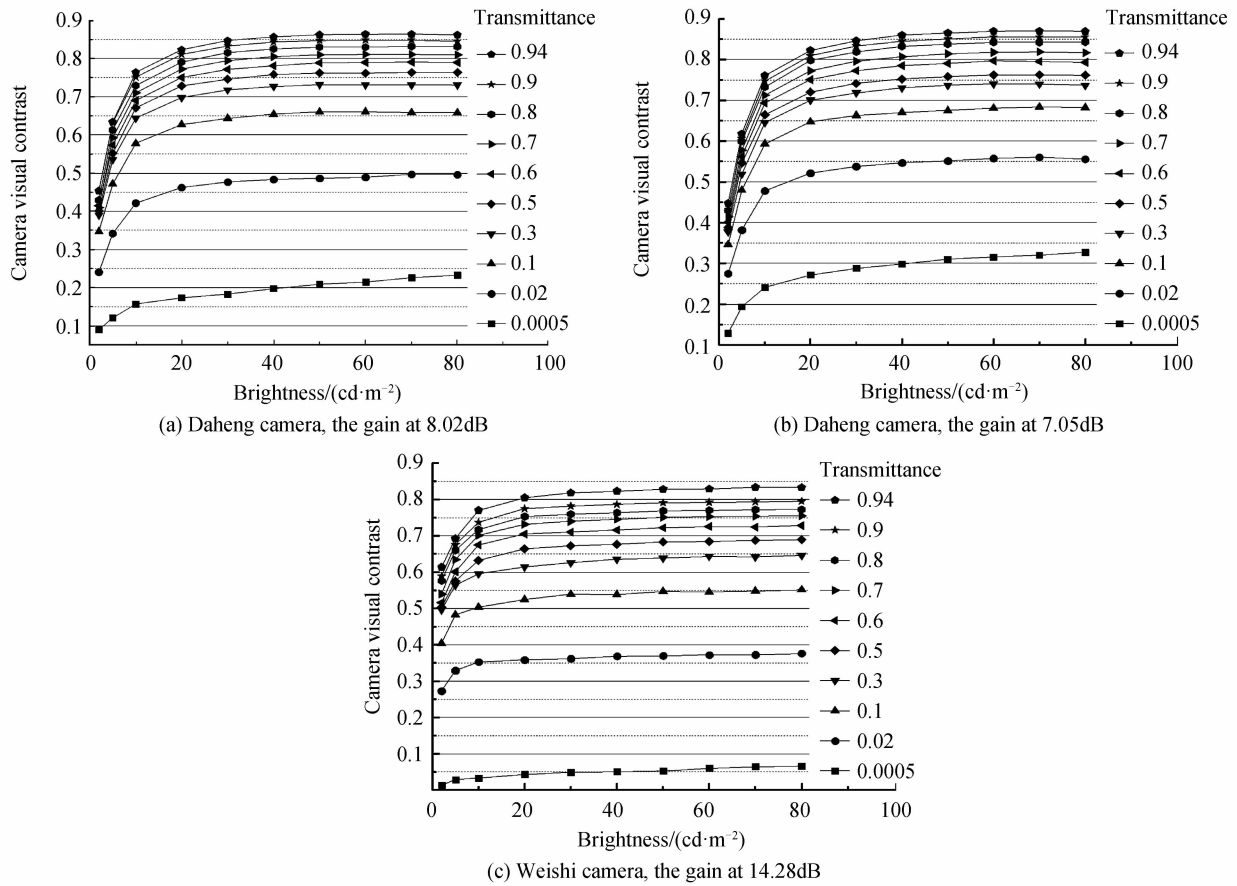


图6 两种摄像机及不同增益条件下,不同透过率下目标/背景对比度随照明亮度的变化

Fig. 6 The change of target / background contrast with the lighting brightness under different transmittance, with the different cameras and gains of camera

图7为透过率为0.94时三种不同成像状态下目标/背景对比度与照明亮度曲线对比.由图6和图7可以看出,摄像机的光谱特性和增益参量等会对目标/背景对比度与照明亮度曲线产生影响,在相同的透过率和相同的亮度下,观测系统不同,获得的目标/背景对比度会不同.同一摄像机,增益参量不同时,目标/背景对比度与照明亮度曲线趋势基本相同;但是目标/背景对比度幅度不同,透过率越低,目标/背景对比度差别越大.不同摄像机,光谱特性不同,目标/背景对比度与照明亮度曲线趋势不同,但是很相似.由此可以看出,如果以人眼作为观测系统,那么获得的不同透过率条件下的目标/背景对比度与照明亮度曲线应与图6具有相近似的特点.

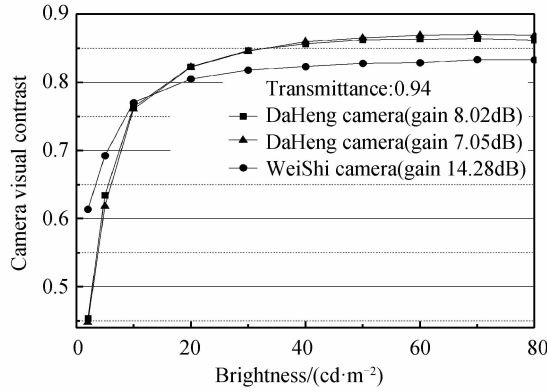


图7 三种成像状态下目标/背景对比度与照明亮度曲线对比

Fig. 7 The comparison of the curves about the relationship of the target / background contrast and illumination intensity in three kinds of imaging state

采用插值法,根据图6中的实验数据,得到图8. 3个曲线分别代表在3种成像条件下,在对比度阈值分别为0.5、0.6、0.7、0.8时,不同的透过率条件下需要提供的照明亮度值,即不同对比度阈值下的亮度与透过率关系曲线.

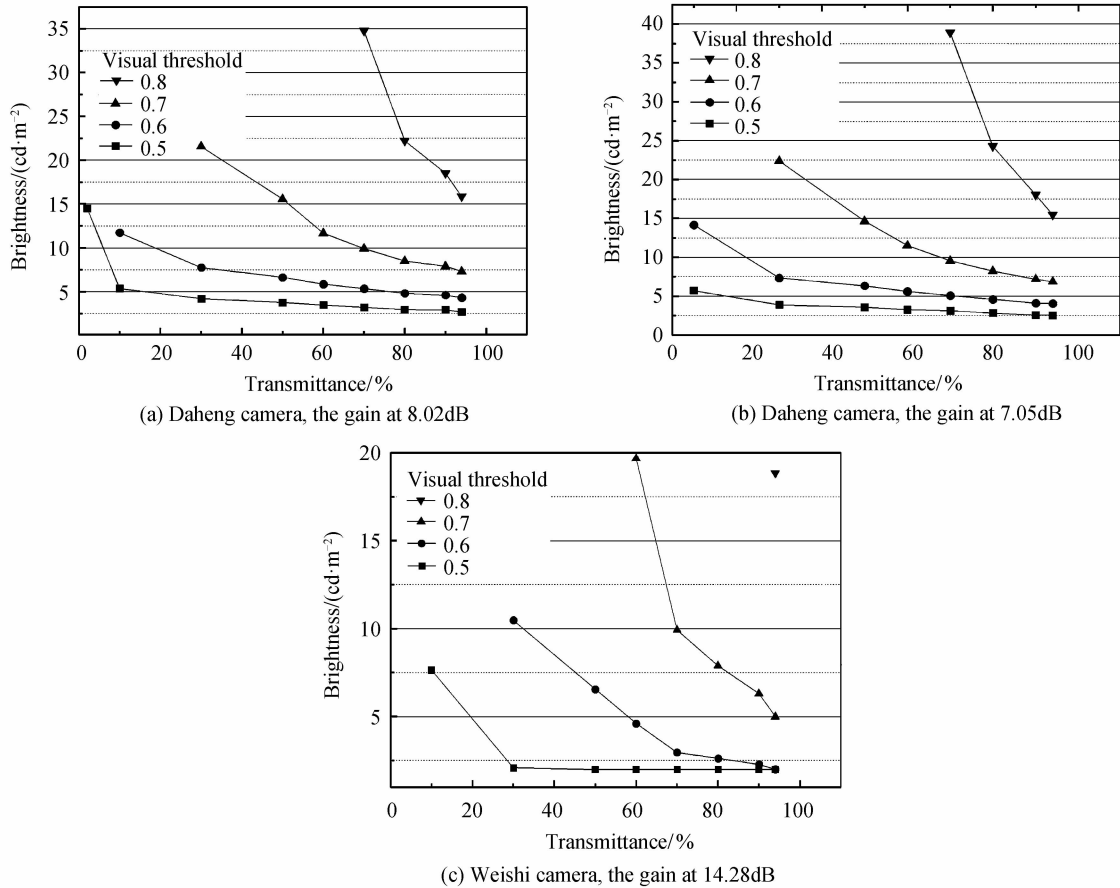


图8 两种摄像机及不同增益条件下,不同对比度阈值下可调节的最小亮度随空气透过率的变化

Fig. 8 The change of minimum brightness that can be adjusted with the air transmittance under different visual threshold, with the different cameras and gains of camera

从图6至图8可以看出亮度、透过率和目标/背景对比度三个量之间的变化关系存在以下四个特征:

- 1) 在任何透过率条件下,目标亮度对比度都随照明亮度的增大而增大,两者成非线性关系. 调节亮度可以提高目标亮度对比度,在一定范围内可以改善低透过率下的能见度;
- 2) 在任何透过率条件下,低亮度时($L < 30 \text{ cd/m}^2$),提高照明亮度会使目标/背景对比度明显提高;高亮度时($L > 30 \text{ cd/m}^2$),提高照明亮度对能见度的改善不明显. 摄像机的参量固定,人眼的特性可自动调节,两

者不同.采用增益不变的摄像机代替人眼带来的后果是:不能模拟当车辆进入隧道时人眼产生的短时的暗适应过程,也就是无法模拟当透过率一定时,在车辆进入隧道的瞬时,增大亮度对提高视觉对比度,改善能见度产生的效果.但是,对比图7中增益为7.05 dB和8.02 dB的大恒摄像机的实验结果曲线可以发现,当透过率为0.94时,两个增益不同的摄像机在相同亮度下获得的摄像机视觉对比度不同,但是差异很小.且尽管两条曲线不同,但是曲线的趋势相同,在高亮度时,提高照明亮度对能见度的改善不明显;

3)透过率限定了目标/背景对比度所能达到的最大值,在低透过率条件下,无论如何提高照明亮度都不能使对比度越过一定的极限值.图6(a)中,当透过率为0.0005时,无法通过提高照明亮度使对比度提高到0.3以上;当透过率为0.02时,无法通过提高照明亮度使对比度提高到0.5以上;

4)对比度阈值越高,亮度与透过率关系曲线的斜率变化越大,即不同透过率下需要的亮度差别越大.

4 透过率对隧道照明实际影响的讨论

当前,我国隧道照明的设计和实现需要遵循公路隧道照明设计细则(JTG T D702-01-2014)^[20],细则中要求200 m以上的隧道需要设置照明,并对隧道各段所需的照明亮度做了规定.隧道各段所需的亮度要求与隧道本身特征,如隧道洞口朝向、单双向以及隧道设计车速等有关,每个隧道根据自身设计参量不同,隧道各段所需的照明亮度都不同.隧道各段的照明亮度范围见表2.

表2 隧道各段照明亮度需求
Table 2 Lighting brightness of each tunnel segment

Tunnel segment	Threshold zone 1	Threshold zone 2	Transition zone 1	Transition zone 2	Transition zone 3	Interior zone	Exit zone 1	Exit zone 2
Demand luminance/(cd · m ⁻²)	15~455	7.5~227.5	2.25~68.25	0.75~22.75	0.3~9.1	1~10	3~30	5~50

由之前的分析可知,照明亮度较大时,提高照明亮度改善能见度无明显效果,对于隧道各段来说,入口段亮度最高,大多数情况入口段照明亮度都在30 cd/m²以上.因此,对于隧道入口段,通过提高照明亮度改善能见度不是理想的方法.除入口段的其他段亮度都较低,尤其是过渡段2、3和中间段,正常照明亮度都在30 cd/m²以下,因此,对于这三段,在隧道烟雾浓度大,透过率低的情况下,提高照明亮度增加目标/背景对比度,改善能见度,是非常直接有效的提高行车安全的手段.

细则中规定不同速度、不同交通量下隧道各段应采用不同的照明亮度,如以隧道中间段为例,设计车速为100 km/h时,对于单向交通,照明亮度规定为:6.5 cd/m² ($N \geq 1200 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$),4.5 cd/m² ($350 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln}) < N < 1200 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$),3 cd/m² ($N \leq 350 \text{ veh}/(\text{h} \cdot \text{ln})$).通过对车速和交通量的限定说明在不同烟雾浓度即不同透过率时应采取不同的亮度,从而提高对比度.但是,对车速和交通量的分档较少,尤其是在实际隧道中,即使交通量相同由于车型不同、通风处理效果不同会使隧道内的烟雾浓度和透过率在很大的范围内变化,对于不同的烟雾浓度采取相同的照明亮度可能导致在目标/背景对比度低于对比度阈值,严重影响驾驶员视觉.因此,在实际隧道运营中,有必要根据实际烟雾浓度和透过率状况调节亮度.

5 结论

本文实验测试了透过率、照明亮度和目标/背景对比度三者之间的关系,给出了不同透过率条件下目标/背景对比度随照明亮度的变化关系和不同对比度阈值下,透过率与最小照明亮度的关系.根据实验结果和数据分析可知,通过调节照明亮度可以提高能见度,但是两者是非线性关系,在照明亮度达到一定值后再提高亮度对能见度提高帮助不大.在低透过率情况下,加大照明亮度提高目标背景对比度,对于改善隧道能见度,保证行车安全是直接有效的手段.

参考文献

- [1] DU Kun. Research of drivers' psychology environment in extra-long tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. 杜坤. 长大隧道驾驶员心理研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- [2] WNAG Jian-ping, YAN Xiao-long, XU Xiao-bing. Color-rendering properties and analysis on road lighting power density under mesopic vision based on reaction time[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(5): 595-603. 王建平, 严晓龙, 徐晓冰. 基于反应时间的中间视觉道路照明功率密度分析及显色性能研究[J]. *发光学报*, 2015, 36(5): 595-603.
- [3] ZHOU Yu-han, ZHU He-hua, FENG Shou-zhong. Effect of highway tunnel lighting on the tunnel visibility[J]. *China*

- Illuminating Engineering Journal*, 2013, **24**(5): 28-33.
- 周豫菡, 朱合华, 冯守中. 公路隧道基本段照明亮度对隧道能见度的影响研究[J]. 照明工程学报, 2013, **24**(5): 28-33.
- [4] GUAN Xue-feng, ZHAO Hai-tian. The experimental research for visual visibility of electric light source in mist[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2013, **24**(6): 36-41.
- 关雪峰, 赵海天. 电光源在雾气中的视觉可见度实验研究[J]. 照明工程学报, 2013, **24**(6): 36-41.
- [5] ZHOU Yu-han, ZHU He-hua, FENG Shou-zhong. Analysis of concept and calculation of highway tunnel visibility and smoke concentration[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, **30**(10): 152-158.
- 周豫菡, 朱合华, 冯守中. 公路隧道能见度与烟雾浓度的概念辨析及计算分析[J]. 公路交通科技, 2013, **30**(10): 152-158.
- [6] 盛裴宣. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [7] ZHU Chun, ZHANG Xu, MARAWSKA L. Theoretical analysis of visibility in road tunnels[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, **6**(2): 306-311.
- 朱春, 张旭, Marawska. L. 公路隧道能见度理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(2): 306-311.
- [8] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [9] WANG Wei, YE Hui-hai, JIN Da-shan, et al. Study on visibility in highway tunnels and its relevant influencing factors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, **14**(4): 23-26.
- 王玮, 叶慧海, 金大善, 等. 公路隧道能见度及其关联影响因子研究[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(4): 23-26.
- [10] ITO H, MORI T, HIRAKAWA S, et al. Estimation of the critical luminance contrast in tunnel interior lighting[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 2009, **93**(2): 77-83.
- [11] ITO H, SATO M, OSHIMA A, et al. Estimation of the critical luminance contrast for tunnel entrance lighting[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 2009, **93**(2): 97-101.
- [12] OKADA A, KAGA K, ITO H, et al. Total revealing power for tunnel lighting[J]. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, 2006, **90**(8A): 495-503.
- [13] HIRAKAWA S, KARASAWA Y, FUNAKI T. Visibility evaluation of expressway-tunnel lighting in consideration of vehicle headlights[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2015, **193**(2): 1-9.
- [14] 李恭慰. 建筑照明设计手册[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2004.
- [15] YAN Gui-mei. Research on relationship between road tunnel ventilation lighting and safety[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- 闫桂梅. 公路隧道通风照明与行车安全关系研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [16] QIN An. Research on highway road tunnel lighting energy-saving technology based on LED light source [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- 秦岸. 基于 LED 光源的高速公路隧道照明节能技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [17] GB/T 1.1—2009. 吉林省公路隧道 LED 照明应用技术指南[S]. 吉林省交通厅.
- [18] YANG Chun-yong, YANG Jie, CHEN Zhen-wei. The FOV selection of receiver and distributed optimization of LEDs for indoor visible light communication[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2016, **27**(5): 491-497.
- 杨春勇, 杨杰, 陈振威. 室内可见光通信接收机视场角选择与 LED 分布优化[J]. 光电子. 激光, 2016, **27**(5): 491-497.
- [19] WANG Hui-qin, WANG Yan-gang, CAO Ming-hua, et al. Impact of atmospheric visibility on laser intensity in sand and dust weather[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **44**(2): 0229001.
- 王慧琴, 王彦刚, 曹明华, 等. 沙尘天气下大气能见度对激光光强的影响[J]. 光子学报, 2014, **44**(2): 0229001.
- [20] JTG/TD70/2-01-2014, 公路隧道照明设计细则[S]. 中华人民共和国交通部.